

Тонкопленочный емкостный датчик давления

А. А. КАЗАРЯН, Е. В. СТРЕЛЬЦОВ

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского, Жуковский,
Россия, e-mail: wtdiv@tsagi.ru

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследований тонкопленочных емкостных датчиков для измерений статического и пульсирующего давлений. Мембрана датчика изготовлена из сплава Fe—Ni.

Ключевые слова: статическое давление, пульсации, емкостный датчик.

The results of theoretical and experimental studies of capacitive thin film sensors for static and pulsed pressure measurement are presented. With this aim the membrane of sensor is manufactured from Fe—Ni alloy.

Key words: static pressure, pulses, capacitive sensor.

Одним из важных факторов, характеризующих обтекание потоком газа объектов авиационной техники, является распределение давления на поверхностях исследуемых конструкций. От этого зависят сохранение качества потока и изучение распределения полей статического давления на тонких стенках. Тонкие профили практически невозможно дренировать, что затрудняет крепление традиционных объемных датчиков, а точность измерений с помощью пленочных емкостных датчиков (ПЕД) с мембраной из диэлектрической пленки, в частности полиимидной, низкая. Экспериментальные исследования номинальной статической функции преобразования (НСФП) показали, что такие датчики при вариации нагрузки, т. е. статического давления, обладают гистерезисом не менее 25—30 %. В данной работе для расширения нижнего частотного предела измеряемого давления с 20 Гц до нуля полиимидную пленку заменили на пленку из сплава Fe—Ni или Ni, используемых в зарубежных и отечественных микрофонах в качестве материала мембраны. Кроме этого, для уменьшения внешних электромагнитных помех, что важно при измерениях низких уровней пульсаций давления, экран датчика изготовлен из фольгированной полиимидной пленки вместо металлизированной, что обеспечивает измерения статического давления очень низкой частоты (до нуля) практически без остаточной деформации после воздействия нагрузки.

Цель настоящей работы — расширение области применения, повышение точности раздельного и одновременного измерений полей статического (с погрешностью до 0,5 %) и пульсирующего (с погрешностью 10—15 %) давлений с применением модернизированной конструкции ПЕД, мембрана которого выполнена из сплава, а ответная обкладка и экраны — из фольгированной диэлектрической пленки. Особенности создания такой конструкции связаны с необходимостью повышения эффективности измерительной системы при сборе и обработке информации об аэродинамических, звуковых явлениях в газовом потоке, что одновременно позволяет измерять, в частности, температуру, параметры вибрации и т. д., и приводит к сокращению материальных и аппаратных затрат. Вместе с тем исследования ПЕД неразрывно связаны с разработками конструкции и технологии изготовления мембраны датчиков [1, 2], инструментальной оснастки, а также способа натяжения мембраны на поверхности основания датчика с несколькими десятками емкост-

ных чувствительных элементов на одной подложке [3, 4], проведением соответствующих экспериментов [5].

Ниже описаны новые принципы построения ПЕД статического и быстропеременного давлений, основанные на использовании зависимости изменения емкости мембраны из высококачественного сплава и нанесенного на ее поверхность высокомолекулярного линейного полимера от изгиба при воздействии давления.

На рис. 1 представлена конструкция модернизированного датчика из нескольких чувствительных элементов (ЧЭ) [6]. Основание датчика из фольгированной Cu или Ni диэлектрической пленки содержит экран 9 на нижней поверхности диэлектрической пленки 8. На ее верхней поверхности сформированы экран 7, обкладки 6 с выводами, образующие ЧЭ датчика. Датчик имеет опорные отверстия 13 для связи с атмосферой, диэлектрическую пленку 5 с ячейками 4, мембрану 2 из металлической пленки, обе стороны которой покрыты диэлектрическими пленками 1 и 3.

От влияния внешних электромагнитных помех выводы защищены экраном 15, покрытым диэлектрическими пленками 1, 3. Мембрана 2 и экран 15 электрически изолированы друг от друга пленкой-изолятором 14. Толщину изоляционной пленки δ между экраном 15 и мембраной 2 выбирают 3—5 мкм. Напряжение поляризации на мембрану подают по тонкому изолированному проводу 16. На изделии 11 датчик монтируют через диэлектрическую пленку 10 и канавку 12.

Металлическая мембрана 2, покрытая диэлектрическими пленками 1, 3, в частности, из полиимида, отличается повышенной эластичностью, в результате чего при натяжении предотвращается появление дефектов, трещин, неровностей и т. д. на поверхности датчика. При этом достигается качественная сборка и гарантируются высокие метрологические характеристики датчика. В зависимости от измеряемого давления толщину металлических пленок в конструкции датчика выбирают одинаковой и равной: 2, 5, 7, 10, 20 мкм. Для измерений локальных давлений диаметр ячейки 4 в диэлектрической пленке 5 составляет 0,5—1,0 мм при количестве ячеек несколько десятков. При одиночном отверстии под мембраной диаметр ячейки равен 3—6 мм, размеры обкладок 6 от 4×6 до 6×9 мм. Неподвижные обкладки 6 круглой, квадратной либо прямоугольной формы из Ni или Cu

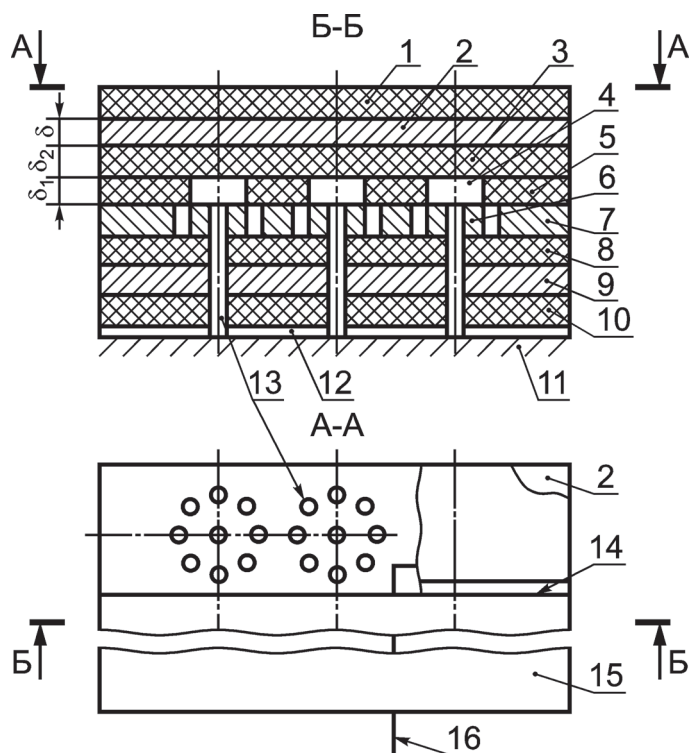


Рис. 1. Конструкция емкостного датчика давления:

1, 3, 5, 8, 10, 14 — диэлектрические пленки из полиимида; 2 — мембрана; 4 — ячейка; 6 — обкладка; 7, 9, 15 — экраны; 11 — изделие; 12 — канавка; 13 — опорные отверстия; 16 — провод

имеют толщину 3—5 мкм. Толщина диэлектрических пленок 8, 10 составляет 5—12 мкм, диэлектрической пленки 5 из полиимида или из стеклоткани, пропитанной клеем, 4—60 мкм. Обкладки 6 с выводами, разметка опорных отверстий 13 выполнены методом фотолитографии. Между выводами и экраном 7 расстояние 0,3—1,0 мм. Ширина выводов 0,5—1,0 мм, их пайка на нижней поверхности мембраны обычная. Собранный пакет датчика (сечение Б—Б) скрепляют жидким или сухим клеем-пленкой на эпоксидно-каучуковой основе или другими клеями. Пленки из полиамидокислотного лака наносятся на поверхности мембраны и экрана по известной технологии [1].

Для измерений давлений на одной подложке размещают от одного до нескольких десятков ЧЭ. При расчете емкостных тонкопленочных датчиков давления полагают, что материал мембраны однороден и ее упругие свойства одинаковы во всех направлениях, диэлектрические пленки 1, 3 толщиной 5—12 мкм не влияют на ее деформирование (изгиб). Если толщина этих пленок существенно меньше толщины мембраны 2, то при расчетах используют модуль упругости, коэффициент Пуассона, толщину металла. (В противном случае кроме этих параметров учитывают толщину диэлектрической пленки.) Такой упрощенный подход позволил описать физическую основу для применения предложенного датчика и получить совпадение расчетных и экспериментальных данных [1].

Размеры ЧЭ и датчика выбирают с учетом вида изделия и требований проводимого эксперимента. Предложенная конструкция позволяет реализовать метод бездренажного определения полей давлений в диапазоне частот от нуля до

звукового и выше. Для получения представления о принципах работы предложенного емкостного датчика пренебрегаем амортизирующим действием воздушной прослойки и краевыми эффектами [4].

Чувствительность датчика в случае конструкции с малым воздушным зазором δ_1 не зависит от толщины диэлектрической пленки δ_2 при условии, что емкость утечки внешней цепи намного меньше по сравнению с емкостью ЧЭ датчика. Это исключает увеличение жесткости воздушной прослойки. Жесткость воздушной прослойки толщиной $\delta_1 = 4 \cdot 10^{-5}$ м, площадью $S = 6,4 \cdot 10^{-5}$ м² при скорости звука в воздухе $v = 333$ м/с, плотности воздуха $\rho = 1,29 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ и ускорения $g = 9,81$ м/с² будет

$$W_0 = v^2 \rho S / (g \delta_1) = 1,3 \cdot 10^5 S / \delta_1 = 2,34 \cdot 10^5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}.$$

Как известно, для снижения отрицательного влияния упругости воздуха, т. е. ограничения чувствительности, в обычных конденсаторных микрофонах неподвижную обкладку 6 перфорируют, что повышает чувствительность датчика не менее, чем на порядок. Число перфорированных опорных отверстий при заданной площади S , диаметре перфорации 0,5—1,0 мм выбирают максимальным.

Другая особенность, с которой сталкиваются при высоких частотах, инерционность воздушной прослойки, соприкасающейся с вибрирующей мембраной. При этом масса воздушного слоя может быть сравнима с массой мембраны. Совокупное действие воздушной прослойки, емкости, сопротивления утечки, внешних электромагнитных помех и т. д. влияет на динамическую чувствительность и частотную характеристику датчика [5].

Рассмотрим принцип работы датчика. При изменении давления на Δp изменяется расстояние между обкладками 6 и мембраной 2, что приводит к изменению емкости C на ΔC . Напряжение поляризации подают на датчик по проводу 16 диаметром 1—2 мкм. Выходное напряжение, снимаемое с выводов обкладки 6, пропорционально коэффициенту приращения емкости ЧЭ $\Delta C / (C \Delta p)$ и напряжению поляризации датчика U , т. е.

$$U_{\text{вых}} = U \Delta C / (C \Delta p).$$

Метрологические характеристики ПЕД типа ДДЕ-4 с диаметрами ячейки 4; 5 и 22 мм, предназначенного для измерений избыточного давления и расположенного на плоской поверхности, исследовали при температуре 25 °С, атмосферном давлении (100±4) кПа ((750±3) мм рт. ст.), влажности около 90 %. Пределы допускаемой относительной погрешности определены в соответствии с [7]. Исследованы НСФП и временная нестабильность датчиков в диапазонах давлений 0—2,5; 0—10; 0—25 кПа. В качестве источника давления использовали водяной манометр класса точности 0,02 с диапазоном измерений 0—2,5 кПа и пресс; для контроля — измерительный прибор класса точности 0,06—0,1 с диапазонами измерений 0—10 и 0—25 кПа. Подложка датчика ПЕД находилась между основанием и стенкой камеры давления в прижатом состоянии. Давление с помощью водяного манометра подавали плавно с шагом 200 Па. При этом НСФП давления в электрический сигнал задавали при восьмикратном плавном изменении давления от 2,5 кПа до 0 (разряжение), затем от 0 до 2,5 кПа. Давление в измерительном ка-

нале выравнивали с помощью пресса. Результаты экспериментальных исследований датчика приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики датчика типа ДДЕ-4

Параметр	Значение параметра	
Размер обкладки конденсатора, мм	6×9	30×35
Диаметр ячейки, мм	4; 5	22
Толщина мембраны из сплава Fe—Ni, мкм	20	20
Толщина датчика, мкм	100—130	1500
Верхний предел измеряемого давления, кПа	25; 14	~14
Нижний порог измерения давления, Па	1,0	1,0
Вариация выходного сигнала (при давлении 25 кПа), %	0,2—0,3	0,2—0,3
Начальная емкость датчика, наклеенного на плоскую поверхность, пФ	19; 16	18—24
Коэффициент преобразования, Па ⁻¹	(4—6)·10 ⁻⁶	(4—6)·10 ⁻⁶
Рабочий диапазон температуры, °С	-25...+25	-25... +50
Погрешность измерения, %	1,4—2,5	0,2—0,3

Статическое давление в диапазоне 0—25 кПа измеряли внутри цилиндрической трубы длиной 154 мм, наружным диаметром 18,5 мм и толщиной стенки 1 мм. Датчик был наклеен на наружной поверхности трубы над отверстием диаметром 6 мм. Для связи ячейки под мембраной с атмосферой служило отверстие диаметром 0,25 мм. Контрольный датчик фирмы DRUCK PDCR-22 (Великобритания) установлен в торце трубы с использованием уплотнителя из резины и пластинок из стали. Давление подавали по резиновой трубке длиной 7—8 м от комбинированной поверочной установки КПУ-3, которая предназначена для создания давления или вакуума и проверки работоспособности мембранных или манометрических приборов, при этом давление контролируют манометром класса точности 0,6 с равномерной шкалой от 0 до 100 кПа, а в режиме разрежения образцовым вакуумметром с диапазоном измерения от -100 кПа до 0. Емкость датчиков измеряли мостом переменного тока Р-589 с погрешностью $\pm(0,1 + 2/C_x)\%$, где C_x — измеряемая емкость, пФ.

Влияние температуры на ПЕД исследовано в термостате в диапазонах температуры 0—25 °С и 23—90 °С, с малым шагом в 16 точках. К выходу ПЕД подключен вольтметр типа ЛРРЛ-95 с погрешностью измерения ± 4 мВ, а выход контрольного датчика PDCR-22 через аппаратуру низкой частоты связан с вольтметром класса точности 0,5 марки М1/06.

Для оценки влияния температуры ПЕД, наклеенные на поверхность трубы, характеризировали сопротивлением R ,

его температурным коэффициентом α_1 в недеформированном состоянии и емкостью C . Изменение R от температуры выражается формулой

$$\Delta R = \alpha_1 R \Delta \theta,$$

где $\Delta \theta$ — отклонение температуры от начального значения θ_0 . При коэффициенте линейного расширения α_2 длина датчика в том же температурном диапазоне изменится на $\Delta l = \alpha_2 l \Delta \theta$.

Эффективный температурный коэффициент сопротивления мембраны из сплава Fe—Ni, обе поверхности которой покрыты полиимидной пленкой, определяется как

$$\alpha = \alpha_1 + \kappa (\alpha_3 - \alpha_2) = 323 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1},$$

где $\alpha_1 = 500 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$; $\kappa = -3,5$ — относительная тензочувствительность сплава; $\alpha_2 = 12,8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, $\alpha_3^{100^\circ \text{С}} = 63,4 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ —

коэффициент линейного расширения полиимидной пленки.

При повышении температуры на 1 °С сопротивление R возрастало на 0,323 Ом. Кажущаяся деформация при температуре 100 °С составляла

$$\varepsilon = \Delta R / (R \kappa) = -0,923 \text{ \%}.$$

Экспериментальному исследованию подвергались четыре датчика одинаковой емкости. Скорость изменения температуры в камере 0,8 °С/мин. Температурный коэффициент емкости составил $\Delta C / \Delta \theta \approx 0,03 \text{ пФ/}^\circ \text{С}$ в диапазоне температуры 23—90 °С и 0,45 пФ/°С в диапазоне 0—25 °С. Емкость соединительных проводов с хлорвиниловой изоляцией длиной 40 см в диапазоне температур 0—90 °С изменяется от 6,6 до 7,8 пФ. Поэтому при расчете емкости датчиков рекомендуется из результатов измерений вычитать емкость проводов или ее компенсировать. Изменение емкости проводов на 1,2 пФ может привести к нестабильности и повышению погрешности датчика. При измерении статического давления и отсутствии связи мембраны с атмосферой погрешность возникает из-за расширения газа под мембраной с ростом температуры [1]. Эта погрешность резко возрастает при температуре выше 93—94 °С. Нестабильность выходной емкости датчиков исследована в нормальных условиях в зависимости от времени в течение 20 мин при статическом давлении на датчик $p=0$ и постоянных давлениях 1; 2,5; 10 и 25 кПа.

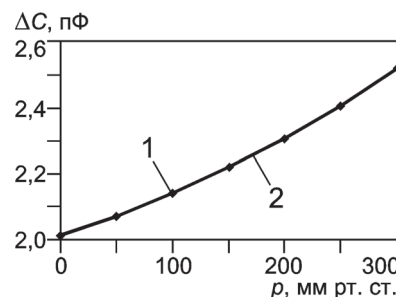


Рис. 2. Номинальная статическая функция преобразования датчика ДДЕ-4:

1 — эксперимент; 2 — аппроксимация полиномом

При изменении приращения емкости коэффициент преобразования датчиков определяют как $N = \Delta C / (C_0 \Delta p)$, где C_0 — начальная емкость датчика при $p = 0$. Коэффициент преобразования на выходе контрольного измерительного канала с усилителем постоянного тока выражается в виде $N = (U_T - U_0) / \Delta p$, где U_T — текущее напряжение при вариации давления Δp ; U_0 — выходное напряжение усилителя при $p = 0$.

Гистерезис НСФП выражали абсолютной величиной разности между меньшими и большими значениями. Их вычисляли как среднее из значений погрешности в каждой точке диапазона измерений, определяемых экспериментально при многократном медленном восьмикратном повышении и понижении давления. Из экспериментов следовало, что при изменении давления от нижнего до верхнего значений выходной сигнал датчика меняется пропорционально измеряемому давлению. При этом определяли приращение емкости $\Delta C = C_T \pm C_0$, где C_T — текущая емкость датчика, измеренная мостом Р-589 при $p \neq 0$.

Нагружение датчика давлением 0—25 кПа показало, что мембрана упруго прогибается внутрь ячейки и при повторных (от 2 до 8) нагружениях и разгрузке наблюдается параллельность прямых и обратных ходов зависимостей $\Delta C(p)$. Это объясняется тем, что в датчике мембранного типа относительные прогибы малы и линейная аппроксимация вполне приемлема. Основное условие, позволяющее достичь линейной зависимости между перемещением центра мембраны ПЕД и приложенным давлением состоит в том, что перемещение центра пластины не должно превышать половины ее толщины. Подробный анализ линейности датчика с газообразным диэлектриком сделан в [1].

Результаты градуировки измерительного канала с емкостным датчиком ДДЕ-4 приведены в табл. 2. Градуировка выполнена при давлениях 10; 16 и 25 кПа для ячеек диаметрами 4 и 5 мм под мембраной. Определены средние значения коэффициентов преобразования. Коэффициент преобразования эталонного (контрольного) датчика PDCR-22 $N = 0,103$ мВ/Па.

Таблица 2

Результаты градуировки емкостного датчика ДДЕ-4

p , кПа	Диаметр ячейки, мм	C_T , пФ	C_0 , пФ	$\Delta C \cdot 10^2$, пФ	$(\Delta C / C_0) \cdot 10^3$	$\frac{\Delta C}{C_0 p} \cdot 10^7$, Па ⁻¹
10	4	41,448	41,426	2,2	5,34	0,534
16	4	41,468	41,426	4,2	1,02	0,534
25	4	41,479	42,426	5,3	1,28	0,514
10	5	42,928	42,868	6,0	1,4	1,4
16	5	42,948	42,868	8,0	1,87	1,17
25	5	43,077	42,868	12,9	3,03	1,2

Начальную емкость моста Р-589 определяли в режиме холостого хода на его выходе, она составила 0,5 пФ. Согласно паспортным данным погрешность измерения емкости мостом $\pm(0,14—0,15)$ %. Начальная емкость ПЕД типа ДДЕ-4 с ячейкой диаметром 4 мм, наклеенного на цилиндрическую трубу диаметром 18,5 мм, составила 19 пФ, что в 2,2 раза больше, чем у датчика, наклеенного на плоскую поверхность.

Зависимость изменения емкости от статического давления внутри трубы при разряжении и нагружении давлением тоже линейна. Наблюдалось изменение начальной емкости на 1,5 % после снятия давления. Давление 1,0; 2,5; 10 и

25 кПа поддерживали неизменным в течение 20 мин. При $p = 0$ выходной сигнал, т. е. приращение емкости, через 3 мин возвращается в начальное состояние. Уход нуля выходных сигналов ДДЕ-4 и контрольного датчика PDCR-22 не наблюдается. Большие погрешности и разброс характеристик обусловлены подачей давления вручную, длительным временем (около 80 мин) выдержки датчика под давлением, большими погрешностями измерительных приборов и т. д. Следовательно, для погрешности 0,2—0,5 % необходимо сократить время измерения от нескольких минут до 10—20 с, что возможно при использовании автоматизированной системы.

Исследованы ПЕД типа ДДЕ-4 с ячейкой диаметром 22 мм, толщиной $\delta_1 = 0,8...1,0$ мм из стеклотекстолита. Толщина мембраны 20 мкм из сплава Fe—Ni (см. рис. 1). Слои датчика склеены пленкой из стеклоткани толщиной 40 мкм, диаметр опорного отверстия 0,3 мм. Большой диаметр ячейки требуется для формирования датчика при заданном коэффициенте преобразования около 10^{-6} Па⁻¹, габаритных размерах датчика $1,5 \times 30 \times 35$ мм без сохранения линейности его НСФП. Результаты измерений зависимости приращения емкости от статического давления для одного датчика показаны на рис. 2. Для исследований была сделана произвольная выборка из 70 датчиков, среди которых оказалось 7 с одинаковым диапазоном измерения 0—39990 Па (0—300 мм рт. ст.). Давление в измерительных полостях градуируемых датчиков задавали с помощью стенда МП-2,5, а измерения осуществляли эталоном давления МПА-15 класса точности 0,01. Выходную электрическую емкость датчика измеряли мостом переменного тока Р-589; температуру окружающего воздуха 20—25 °С — ртутным термометром типа ТЛ-4; влажность 60—80 % — психрометром типа ПБУ-1М. Выходной сигнал измеряли в семи точках диапазона задаваемого давления, включая нулевое и конечное значения; количество измерений в каждой точке равно 20 (по 10 на прямом и обратном ходе). Таким образом, для 7 датчиков определили НСФП, которые аппроксимировали полиномами

третьей и четвертой степеней, погрешность аппроксимации $\pm 0,1$ %.

С учетом нелинейности НСФП 1,0—1,2 % для датчиков с ячейками диаметрами 4; 5 мм и 5—6 % для датчиков с ячейкой диаметром 20—22 мм, гистерезиса 0,2—0,3 %, временной нестабильности 0,2—1,0 %/ч приведенная погрешность измерения в первом случае находится в пределах 1,4—2,5 %, во втором 5,4—7,3 %. Каждый датчик имеет индивидуальную градуировочную характеристику, изменяющуюся во времени. Очевидно, если на рис. 2 верхнюю границу измерений статического давления ограничить линейным участком характеристики 0—100 мм рт. ст. (13332 Па), то суммарная погрешность не превысит 1 %.

Если всю градуировочную характеристику датчика поделить на три линейных участка 0—100, 100—200 и 200—300 мм рт. ст., тогда на каждом участке можно обеспечить погрешность меньше $\pm 1,0$ %.

Еще в одном эксперименте ПЕД типа ДЕГ-4 с ячейкой диаметром 4 мм, мембраной из сплава Fe—Ni был наклеен на поверхность аэродинамической трубы. Градуировки каналов и измерения пульсаций давления выполняли по схеме, приведенной в [1, 5]. На расстоянии 13 мм от ПЕД в конце трубы располагали микрофон фирмы «Брюль и Кьер» (Дания) мод. 4133. Выходное напряжение с микрофона че-

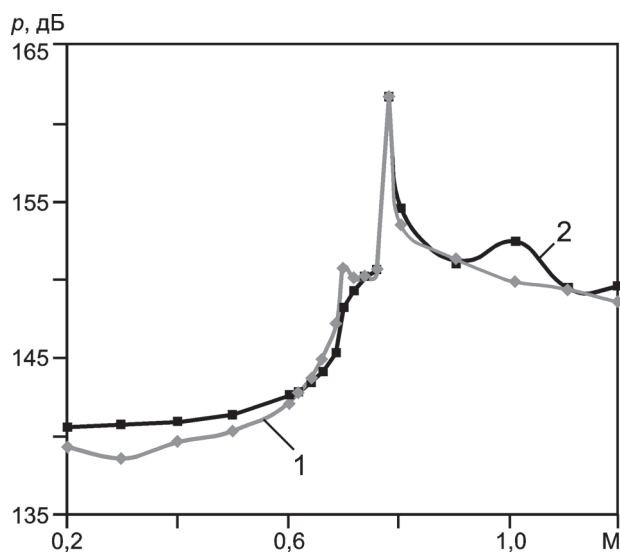


Рис. 3. Зависимости изменения пульсаций давления в середине боковой стенки рабочей части аэродинамической трубы от числа Маха, полученные с использованием микрофона (1) и ПЕД (2)

рез измерительный усилитель мод 2609 и аналого-цифровой преобразователь подали на вход компьютера. Число Маха в аэродинамической трубе изменяли от 0,2 до 1,2. В качестве примера на рис. 3 показана зависимость изменения пульсации давления от числа Маха в измерительных каналах с микрофоном и ПЕД. Результаты измерений в обоих каналах практически совпадают. Некоторые расхождения можно объяснить несовпадением места расположения микрофона и ПЕД. При числе $M=1$ спектральные характеристики микрофона и ПЕД качественно совпадают, но отличаются лишь тем, что коэффициент преобразования канала с ПЕД больше, чем у канала с микрофоном. Из рис. 3 следует, что расхождение результатов измерений пульсации давления микрофоном и ПЕД находится в пределах $\pm(0,5—1,0)$ дБ, за исключением измерения при $M=1$, когда показания ПЕД на 2 дБ выше, чем микрофона. На рис. 4 приведены спектральные характеристики сигналов, показанных на рис. 3, при $M=1$. Для измерений пульсаций давления в зависимости от условий эксперимента выбирают ПЕД с мембраной из диэлектрической пленки или сплава.

В заключение отметим, что мембрана датчика из сплавов позволяет измерять статическое давление с погрешностью менее 1,4—2,5 %; погрешность нелинейности функции преобразования составляет 1,0—1,2 %, временная нестабильность 0,2—1,0 %/ч, гистерезис 0,2—0,3 %. Такими датчиками также можно измерять пульсации давления; погрешности этих измерений рассмотрены в [1, 5]. При нагружении и разгрузке ПЕД давлением гистерезис возникает и исчезает в течение примерно 3 мин. Ширина петли гистерезиса увеличивается при длительном воздействии (10—80 мин) давления 2,5—25 кПа. Чтобы уменьшить погрешность измерения статического давления в аэродинамическом эксперименте до 0,5 %, необходимо сократить время измерения до нескольких десятков секунд и, кроме того, не допускать увеличения рабочей температуры более, чем на 3 °С. Датчики можно применять в одиночном и матричном исполнениях. Повышение точности измерений давления и снижение влияния внешних электромагнитных помех связано с заменой экрана и мембраны из металлизированной полиимидной

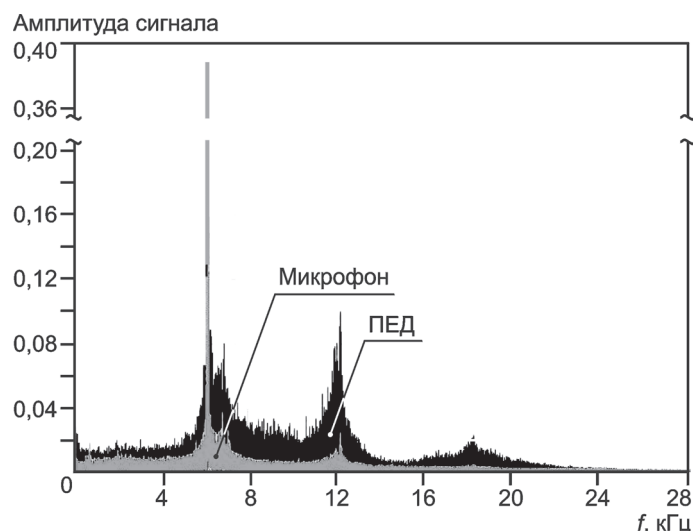


Рис. 4. Спектры сигналов, приведенных на рис. 3, при $M = 1$

пленки в конструкции ПЕД на фольгированную пленку для экрана и пленку из сплава Fe—Ni или Ni, покрытую полиамидокислотным лаком, для мембраны. Рассмотренные емкостные датчики можно использовать в аэро- и машиностроении, энергетике, акустике.

Дальнейшие исследования метрологических характеристик ПЕД будут направлены на компенсацию влияния температуры на результаты измерений давлений согласно методике, приведенной в [8].

Литература

1. Казарян А. А. Пленочные датчики давления. М.: Бумажная галерея, 2006.
2. Пат. 2157978 РФ. Устройство для изготовления мембраны емкостных датчиков давления и способ изготовления мембраны емкостных датчиков давления / А. А. Казарян // Изобретения. Полезные модели. 2000. № 29.
3. Пат. 2336505 РФ. Устройство для изготовления тонкопленочных емкостных чувствительных элементов и способ их сборки / А. А. Казарян, Н. А. Езеев, А. Н. Шестапов // Изобретения. Полезные модели. 2008. № 29.
4. Нурберт Г. П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. Л.: Энергия, 1970.
5. Казарян А. А. Метод измерения пульсации давления тонкопленочным емкостным датчиком // Измерительная техника. 2013. № 7. С. 42—45; Kazaryan A. A. A Method of Measuring Pressure Pulsations by Means of Thin-Film Capacitance Sensors // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N. 7. P. 791—796.
6. Пат. 2485464 РФ. Емкостной датчик давления / А. А. Казарян // Изобретения. Полезные модели. 2013. № 17.
7. ГОСТ 8.401—80. ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования.
8. Пат. 2476842 РФ. Устройство для измерения давления, температуры и теплового потока / А. А. Казарян // Изобретения. Полезные модели. 2013. № 6.

Дата принятия 12.08.2014 г.